

Актуальні питання нафтогазової галузі

УДК 629.123

КОНЦЕПЦІЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПОСТАЧАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ДО УКРАЇНИ

*Є.І. Крижанівський, Вал.В. Зайцев**ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42264,
e-mail: rector@nung.edu.ua*

Наведено концепцію технології морського транспортування стиснутого природного газу (CNG) на суднах CNG та на CNG-контейнеровозах. Описано новий елемент технології морського транспортування стиснутого природного газу – CNG-контейнеровоз та його спеціальні CNG-модулі. Зроблено економічну оцінку такої технології.

Ключові слова: стиснутий природний газ, концепція, контейнер, CNG-модуль, контейнеровоз, CNG-контейнеровоз

Приведена концепция технологии морской транспортировки сжатого природного газа (CNG) на судах CNG и на CNG-контейнеровозах. Описан новый элемент технологии морской транспортировки сжатого природного газа – CNG-контейнеровоз и его специальные CNG-модули. Выполнена экономическая оценка этой технологии.

Ключевые слова: сжатый природный газ, концепция, контейнер, CNG-модуль, контейнеровоз, CNG-контейнеровоз

The concept of technology of marine transportation of the compressed natural gas (CNG) on CNG-ships and on CNG-container ships is given. The new element of technology of marine transportation of the compressed natural gas - the CNG-container ship and his special CNG-modules is described. Economic evaluation of this technology is executed.

Keywords: compressed natural gas, concept, container, CNG-module, container ship, CNG-container ship

ВСТУП

Відповідно до стратегії розвитку нафтогазового комплексу України до 2030 року (надалі – Стратегія) забезпечення прогнозного споживання природного газу та джерел його покриття передбачає видобуток природного газу українськими компаніями за межами України. Привабливими є країни, які мають значні резерви для розширення газовидобутку газу на своїх територіях – Алжир, Лівія, Іран та інші. Перспективним джерелом імпорту газу в Україну є Іран. Ці перспективи пов'язані з використанням газопроводу “Набукко”, який розробляється згідно з програмою INOGATE під егідою ЄС. Однак в силу різних об'єктивних і суб'єктивних чинників ці перспективи зменшуються. Тепер розглянемо Алжирський проект, наведений в Стратегії. Стримуючим фактором у цьому випадку є проблеми транспортування видобутого газу до України. Саме на вирішенні цієї проблеми акцентується увага у концепції.

Питання транспортування газу, особливо через морські акваторії, надзвичайно актуальне і не має однозначної відповіді. Стосовно природного газу нині існує три технології його морського транспортування – підводними трубопроводами або ж газовозами [1, 2], у скрапленому (Liquefied Natural Gas, LNG) чи стиснутому (Compressed Natural Gas, CNG) стані. Кожен із цих способів має свої переваги і недоліки. Проте для України найбільш прийнятним видається транспортування енергоносіїв у вигляді CNG.

В цьому переконує досвід будівництва та експлуатації газопроводу Росія-Туреччина “Голубий потік”, чимала ділянка якого (396 км) прокладена по дну Чорного моря. На цій ділянці споруджено двонитковий трубопровід діаметром 600 мм. Траса укладена зонами можливих зміщень газопроводу через розмиви і хвилі, зсуви, протиснення, сейсмічність та глибоководними течіями. Він проходить на глибинах до 2150 м в умовах агресивного сірководневого

середовища. Через небезпеку локального або спонтанного зминання товщина стінки трубопроводу – 31,5 мм. Практично це не труба, а товстостінний циліндр, на лінійну частину витрачено понад 120 тис. тонн сталі.

До недоліків підводних трубопроводів відносяться: неможливість встановлення проміжних компресорних станцій (в результаті чого "Голубий потік" при тиску на вході 250 атм. на виході має 50...60 атм.), висока вартість ("Голубий потік" – 3,3 млрд. дол. США), при пошкодженні неможливий ремонт, можливі утворення гідратів і пробок при неякісному осушенні газу.

Транспортування газу у скрапленому стані (тобто LNG) є ефективним, коли його треба переправити на великі відстані. Зараз це найпоширеніша технологія при морських газових перевезеннях, але й у неї є свої мінуси. Так, скраплений природний газ – це низькотемпературна рідина (–161°C), яка потребує наявності теплоізованих криогенних ємностей та автономної установки для приготування інертних газів. Окрім того, навіть при порожньому рейсі у трюмах газовоза мусить перебувати не менше ніж 5% від загального обсягу LNG, який перевозиться. Таким чином, помітно знижується коефіцієнт утилізації водотоннажності по чистій вантажопідйомності судна (коефіцієнт корисної дії вантажного простору судна). Зрештою, облаштування інфраструктури для отримання, зберігання і транспортування LNG є досить дорогою і технологічно складною справою.

Для України додатковою проблемою є прохід суден LNG через протоку Босфор.

1. КОНЦЕПЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ МОРЬСЬКОГО ТРАНСПОРТУВАННЯ СТИСНУТОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ (CNG) НА СУДНАХ CNG

Технологія CNG (Compressed Natural Gas – CNG) – це нова проривна технологія морського транспортування природного газу в стисненому стані на спеціальних судах – судах CNG.

Особливість технології полягає в тому, що природний газ можна завантажувати на судна CNG безпосередньо з родовища, а розвантажувати – безпосередньо в мережу споживання. Це виключає необхідність значних капітальних вкладень у будівництво морських трубопроводів або заводів по зріджуванню газу для постачання його на ринок на судах LNG. Основним об'єктом капіталовкладень в новій технології є самі судна CNG. Найпривабливішою технологія CNG є у разі введення в комерційний оборот морських (офшорних) родовищ природного газу.

Технології підводного облаштування морських родовищ природного газу і безпричального завантаження вуглеводневої сировини на судна вже освоєні і широко застосовуються в світовій практиці.

Це означає, що дійсно новим елементом технології морського транспортування стиснутого природного газу є самі судна CNG.

Стан розробки технології CNG за кордоном

Особливістю сучасного етапу в розвитку технології CNG є перехід компаній, зацікавлених в реалізації проектів морського транспортування природного газу, від концептуального аналізу до детального конструкторського опрацювання основних елементів транспортного ланцюга і формування міжнародних консорціумів для практичної реалізації CNG проектів в різних регіонах світу. Поява перших суден CNG і початок комерційних перевезень стиснутого газу можлива в 2011-2012 рр.

Основним елементом судна CNG є транспортна система, що забезпечує завантаження/розвантаження природного газу, його попередню підготовку, стиснення і зберігання в ємностях під тиском.

Кілька міжнародних компаній (EnerSea Transport LLC (США), Knutsen OAS Shipping і Compressed Energy Technology AS (обидві – Норвегія), TransCanada Pipeline Ltd., Trans Ocean Gas Inc., Sea NG Management Corporation (усі – Канада) уже зараз працюють над проектами суден CNG місткістю від 3 до 33 мільйонів кубометрів природного газу. Очевидно, що судна з великим тоннажем будуть ходити на довгих лініях (2...2,5 тисячі морських миль), а малотоннажні працюватимуть на коротких лініях місцевого значення. Кожна з компаній має в активі концептуальні проекти суден CNG, що отримали схвалення (Approval in Principle) класифікаційних організацій DNV або ABS.

Потенційний попит на послуги з транспортування стиснутого природного газу із використанням судів CNG в багато разів перевершує реальні можливості судноплавних компаній на початковому етапі становлення нової транспортної індустрії, що забезпечить судноплавним компаніям на тривалу перспективу можливість вибору найперспективніших в економічному плані пропозицій. При цьому компанії "першопроходці" у застосуванні нової технології транспортування газу матимуть в майбутньому істотні конкурентні переваги, аж до монопольного положення на ринках окремих регіонів.

За основними кораблебудівними параметрами судна CNG будуть значною мірою аналогічні сучасним суднам LNG. Головні розміри суден CNG знаходяться в межах: довжина – 280...320 м; ширина – 55...60 м; осадка – 13,5...14,5 м. Швидкість повного ходу суден CNG – 17,5...18,0 вузлів.

Концепція припускає, що облаштування родовища обмежується пристроєм беспричального терміналу на основі буя STL, через який природний газ надходить безпосередньо на судно CNG без будь-якої підготовки на місці.

На судні CNG розміщуються:

- пристрій для приймання природного газу з офшорного терміналу;
- система комплексної підготовки газу, аналогічна за складом звичним установкам комплексної підготовки природного газу на родовищах;

- система компримування;
- система зберігання стиснутого газу;
- система відвантаження газу на офшорний приймальний термінал.

Для роботи з офшорними терміналами судно обладнується системою динамічного позиціювання.

Вартість транспортування газу на суднах CNG

Будівництво суден CNG на українських заводах обійдеться інвесторам в 1,5 рази дешевше, ніж будівництво на зарубіжних верфях. За рахунок низької собівартості транспортних послуг на суднах CNG українського виробництва, судновласник матиме можливість широкого маневру в області встановлення тарифів на транспортування газу.

За оцінками міжнародних експертів транспортування природного газу на суднах CNG буде в 1,5...2,0 рази економічно більш вигідним порівняно з транспортуванням морськими трубопроводами або в зрідженому стані на суднах LNG (Liquefied Natural Gas) при обсягах поставок природного газу від 0,5 до 4,0 млрд. м³ на рік на маршрутах протяжністю від 250 до 2500 морських миль.

Можливості України у проектуванні і побудові суден CNG

В Україні є достатній науково-виробничий потенціал для створення ключового елемента нової технології – власних конкурентноздатних суден CNG. На українських суднобудівних заводах можуть будуватися судна дедвейтом до 80 тис. т, довжиною до 300 м і шириною до 35,0 м.

2. КОНЦЕПЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУВАННЯ СТИСНУТОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ (CNG) НА СУДНАХ – КОНТЕЙНЕРОВОЗАХ

Особливість запропонованої технології на відміну від технології морського транспортування на суднах CNG полягає в тому, що контейнеровоз завантажується на будь-якому контейнерному терміналі морського порту спеціальними 20-ти футовими морськими контейнерами, які містять ємності для зберігання стиснутого газу. Завантаження природним газом можливе також і на морських промислах безпосередньо в ємності контейнерів, розміщених на суднах-контейнеровозах аналогічно завантаженню суден CNG.

Очищений природний газ під тиском, який є у газовому родовищі (приблизно 20...25 МПа) що є достатнім для компресії газу, трубопроводом високого тиску подається з родовища в магістральну вантажну систему високого тиску судна-контейнеровоза. Труби високого тиску магістральних трубопроводів об'єднують блоки CNG-модулів (100...150 шт), що розміщені на палубі і в трюмах контейнеровоза. Від блоків

стиснутий газ подається трубами меншого діаметра до кожного CNG-модуля. Розподіл газу по ємностях високого тиску проводиться за допомогою локальної вантажної системи, яка змонтована у кожному CNG-модулі.

Розвантаження газу безпосередньо в газотранспортну систему або підземне сховище газу України здійснюється на відповідних терміналах. В газотранспортну систему або в підземне сховище газу (Глебівське підземне сховище газу в Криму) за допомогою системи трубопроводів розвантажується тільки стиснутий природний газ, який знаходиться в CNG-модулях.

Завантаження/розвантаження всіх CNG-модулів проводиться одночасно.

Розвантаження заповнених контейнерів за потреби може проводитися на будь-якому контейнерному терміналі в морському порту України. З порту автомобілями або залізницею контейнери можуть транспортуватися в потрібний пункт України. Це виключає необхідність у значних капітальних вкладеннях в будівництво морських трубопроводів або заводів по зріджуванню газу для постачання його на ринок суднами LNG, виключає будівництво або придбання суден-газовозів CNG. Основним об'єктом капіталовкладень у запропонованій новій технології є морські контейнери із спеціальними балонами для стиснутого природного газу. Це привабливіша технологія морського транспортування природного газу порівняно з технологією морського транспортування за допомогою суден CNG.

Це означає, що новим елементом технології морського транспортування стиснутого природного газу є самі CNG-контейнеровози із спеціальними CNG-модулями (рис. 1, 2).

Проектування CNG-модуля

У рамках співпраці НУК та ІФТУНГ було виконано ескізне проектування CNG-модуля для CNG-контейнеровозів.

CNG-контейнеровози та балони високого тиску, що транспортуються ними в CNG-модулях, можуть експлуатуватися в широкому діапазоні значень тиску та температури метану. Тому для проектування CNG-балонів необхідно знати теплофізичні властивості метану.

Основне, що потрібно знати з властивостей метану на початкових стадіях проектування балонів – залежність густини метану від його температури і тиску. Зважаючи на те, що ця залежність не відповідає властивостям ідеального газу, необхідно використовувати результати експериментальних досліджень, викладених у довідниковій літературі.

На базі табличних даних довідникової літератури були розроблені алгоритм і програма, що дозволяють за заданих температури і тиску метану, визначити густину метану. Програма інтерполює табличні дані за допомогою кубічних сплайнів.

Графічне представлення залежності густини метану від температури і тиску показано на рисунках 3, 4.

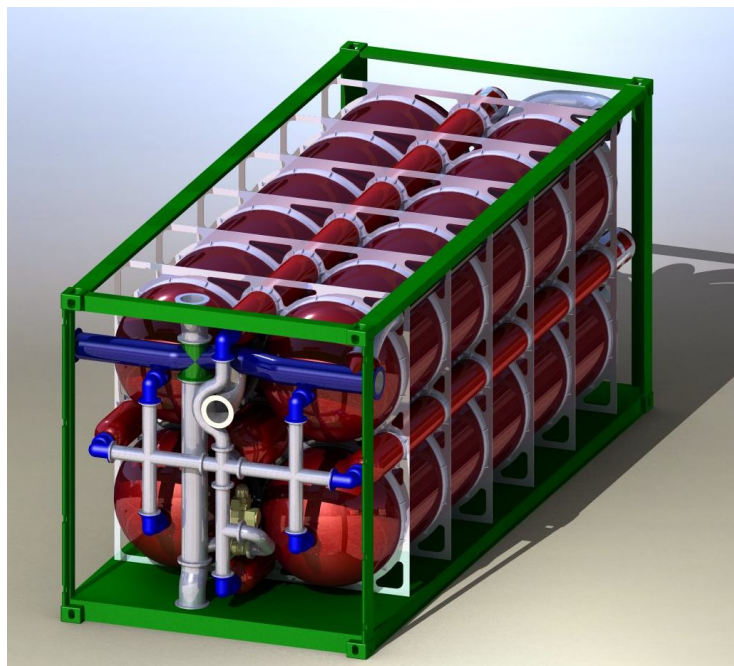


Рисунок 1 — CNG-модуль без зовнішньої обшивки та теплоізоляції

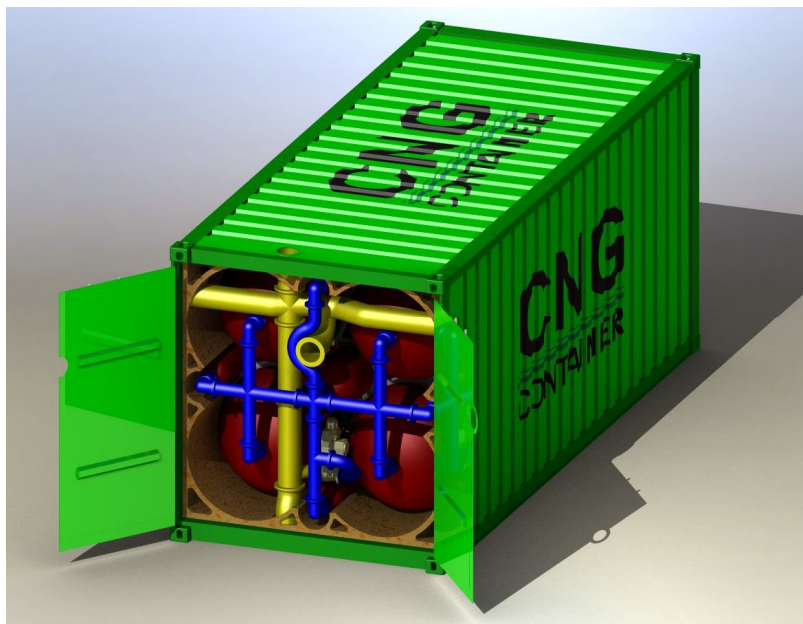


Рисунок 2 — CNG-модуль

Зважаючи на те, що CNG-балони є ємностями високого тиску, в ході початкового проектування було проаналізовано нормативні документи, що регламентують розрахунки міцності таких конструкцій.

Основним документом для цього є **ГОСТ 14249-89 "СОСУДЫ И АППАРАТЫ. Нормы и методы расчета на прочность"**.

Використовуючи вимоги **ГОСТ 14249-89**, дані про властивості метану та математичні залежності для визначення геометричних параметрів циліндричних і сферичних фігур було розроблено алгоритм і програму для визначення основних геометричних і експлуатаційних параметрів CNG-балонів (рис. 5).

Потім було розглянуто різні варіанти комплектування контейнера (рис. 6 – 9) та вибрано варіант з найбільшою ємністю (рис. 2, 7). Товщина стінок балонів на цьому етапі визначалися відповідно до **ГОСТ 14249-89**.

У ході цих розрахунків розглядалися різні матеріали для виготовлення балонів (табл. 1).

При проектуванні контейнера однією з ключових характеристик балонів є величина k – частка маси газу в повній масі балона з газом, що залежить як від матеріалу балона, так і від робочого тиску в балоні (рис. 10).

Після розрахунків за **ГОСТ 14249-89** були проведені перевірочні розрахунки за МКЕ (рис. 11 – 13) і внесені незначні зміни в конструкцію балону.

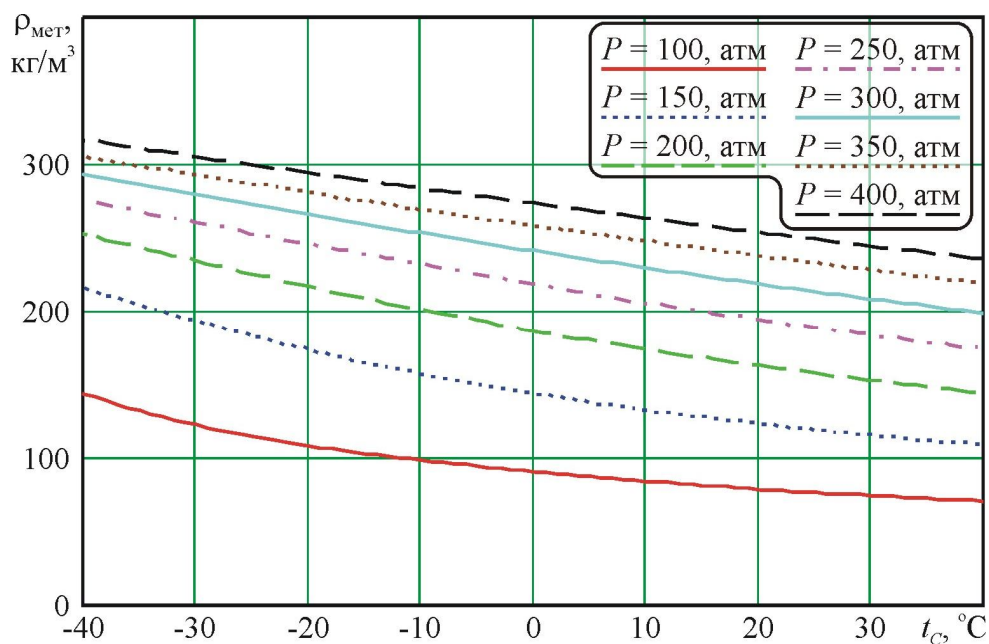


Рисунок 3 — Залежність густини метану від його температури за тиску від 100 до 400 атм.

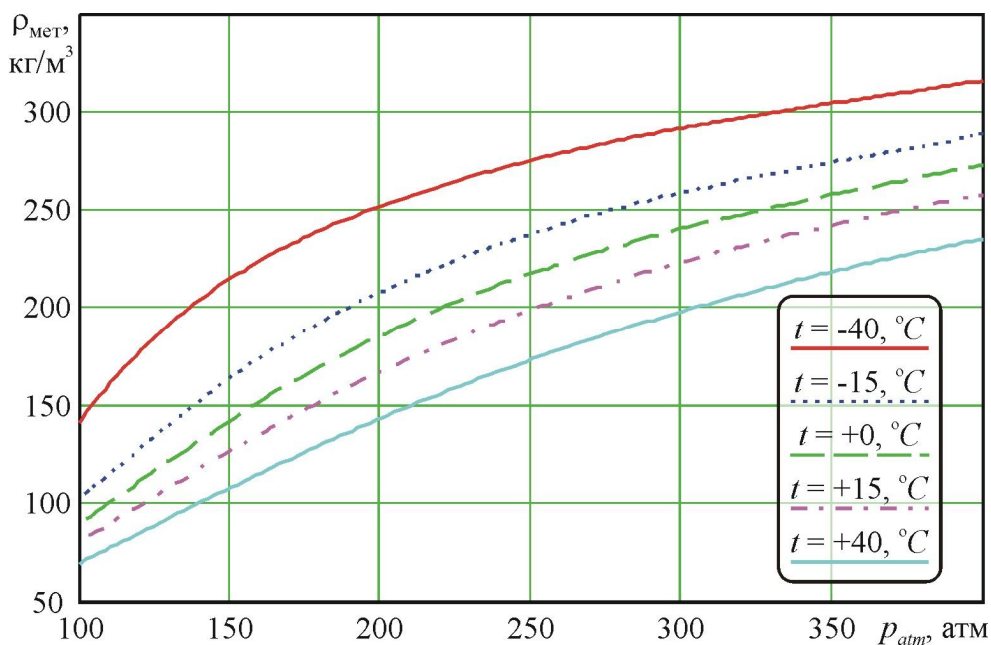


Рисунок 4 — Залежність густини метану від його тиску за температури від -40°C до $+40^{\circ}\text{C}$

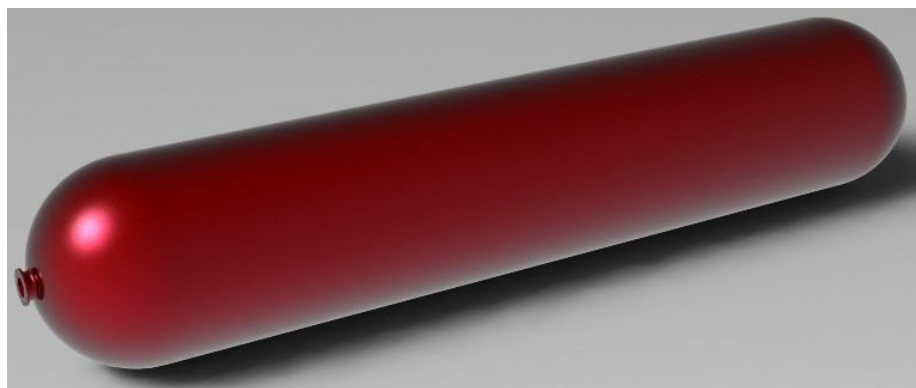


Рисунок 5 — 3D-модель CNG-балона

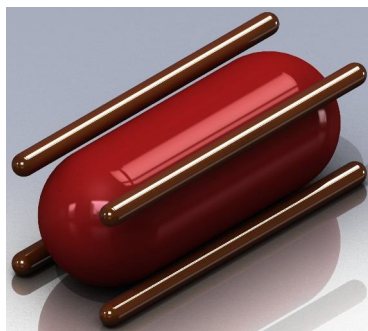


Рисунок 6 - Схема компоновання "1+4"

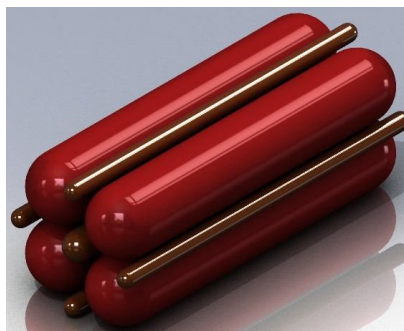


Рисунок 7 - Схема компоновання "4+5"

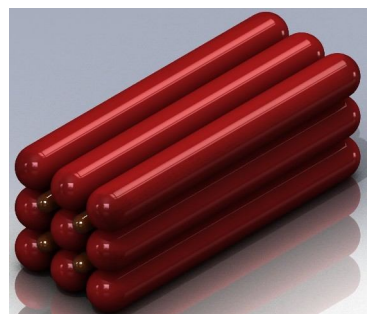


Рисунок 8 - Схема компоновання "9+4"

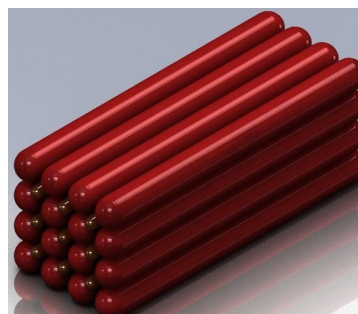


Рисунок 9 - Схема компоновання "16+9"

Таблиця 1 – Матеріали для виготовлення балонів

Найменування матеріалу	Марка матеріалу	Допустиме напруження $[\sigma]$, МПа	Густина ρ , кг/м ³
Сталь (St.)	09Г2С	215	7820
	X80	314	7700
Титан (Ti)	BT3-1	540	4500
	ПТ-3В	357	4450
Алюміній (Al.)	1561 Чат-Ф	138	2700
Склопластик (Glasfas.)	PBMH-10	510	2600

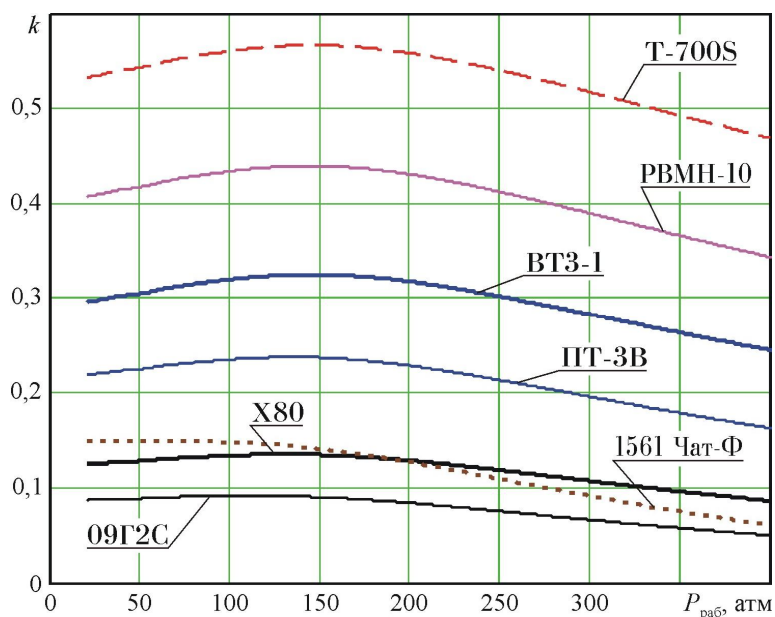


Рисунок 10 – Залежність частки маси газу в повній масі балона з газом від робочого тиску і матеріалу балона

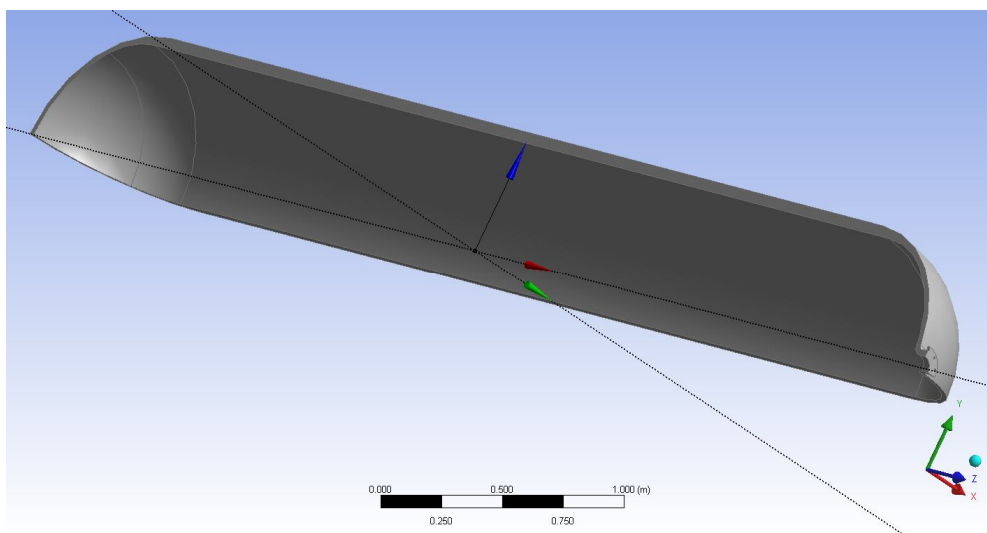


Рисунок 11 – Розрахункова модель CNG-балона

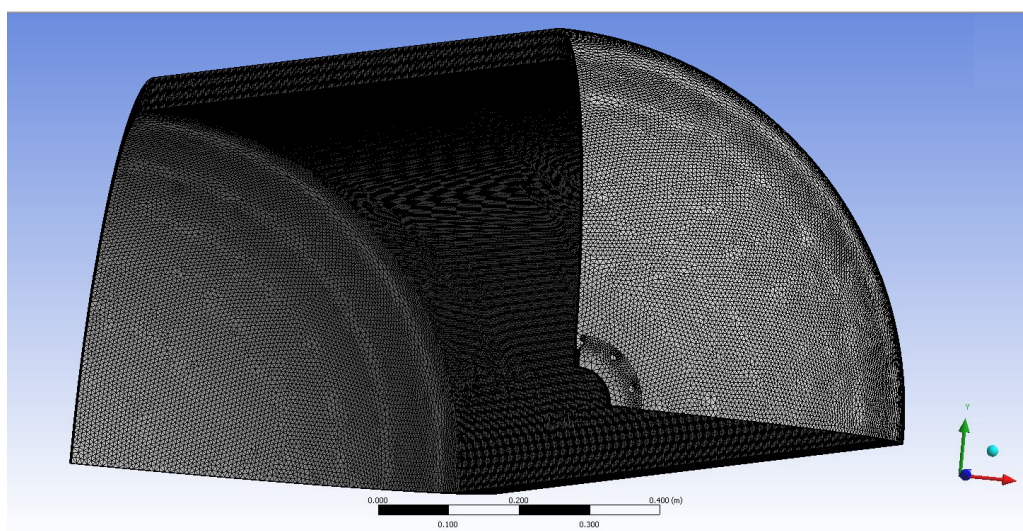


Рисунок 12 – Кінцево-елементна модель CNG-балона

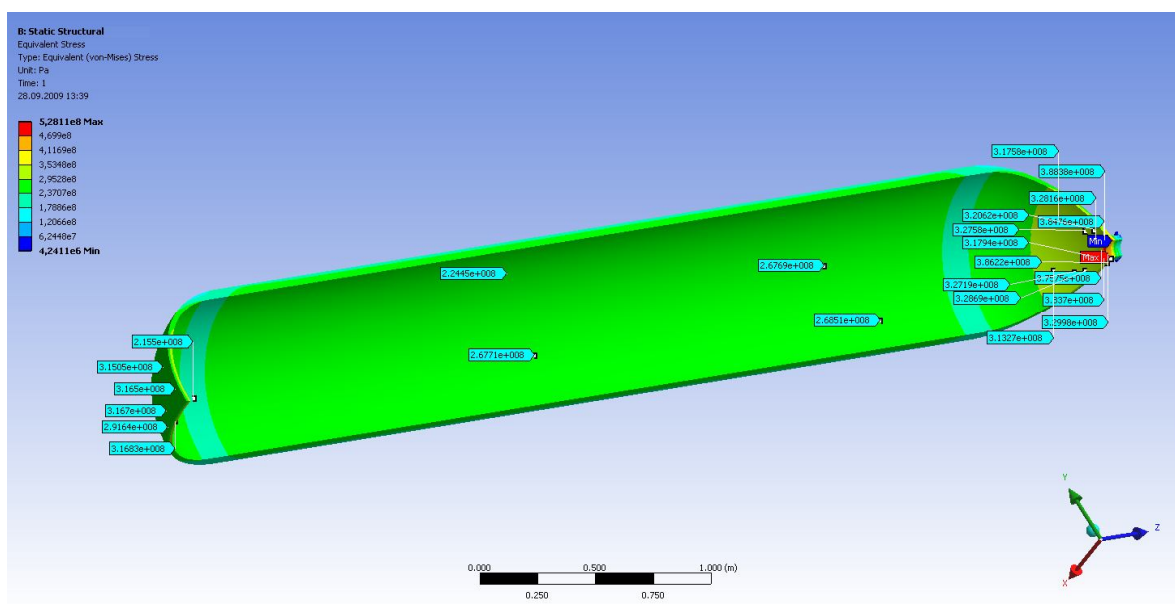


Рисунок 13 – Результати розрахунку напружень за Мізесом для CNG-балона (Сталь X80)

Таблиця 2 – Результати оцінок

Лінія	– Шкікда-Іллічівськ
Протяжність лінії	– 1650 миль (3056 км)
Річна провозоздатність 1-го контейнеровоза	– 1,5 млрд.м ³
Річна провозоздатність флоту	– 10,5 млрд.м ³
Кількість контейнеровозів	– 7 шт.
Кількість модульного парку	– 35840 шт.
Будівельна вартість модульного парку	– 1,78 млрд.долл.
Питомі капіталовкладення	– 178,3 USD/1000м ³
Транспортний тариф на (100 км)	– 2,2 USD/1000м ³ .

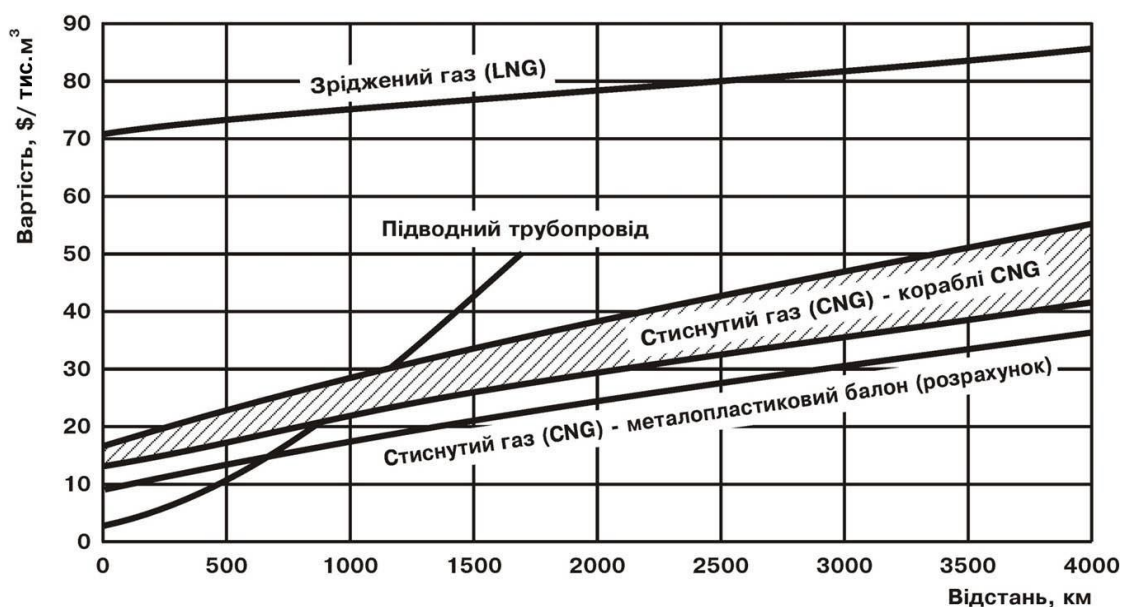


Рисунок 14 – Порівняльні тарифи перевезення природного газу (підводний трубопровід LNG, CNG)

Як результат роботи було створено математичні моделі, програми розрахунку параметрів CNG-модулів, а також оформлено і отримано три патенти на корисну модель [3 – 5].

Основні характеристики CNG-модуля, який було спроектовано, такі: довжина – 6,10 м; ширина – 2,37 м; висота – 2,59 м; кількість балонів – 9 шт; робочий тиск – 25 МПа; максимальний тиск – 42,5 МПа; об'єм балонів одного модуля у стисненому стані – 19,5 м³; еквівалентна вантажомісткість одного модуля (за атмосферного тиску) – 5900 м³.

ТРАНСПОРТНІ МОЖЛИВОСТІ ТА ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ МОРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ СТИСНУТОГО ГАЗУ CNG-КОНТЕЙНЕРОВОЗАМИ

Оцінка транспортних можливостей запропонованої системи морських перевезень газу зафрахтованими контейнеровозами було здійснено на прикладі транспортування природного газу з алжирського порту на Середземному морі Шкікда (Skikda) до порту Іллічівськ на Чорному морі. Вантажомісткість одного контейнеровоза за один рейс – 4480 контейнерів.

Економічна оцінка проводилась для запропонованої системи морського транспортування газу зафрахтованими контейнеровозами, і порівняння ціни російського газу, що постачається до України (179,5 USD/1000 м³), з ціною газу в українському порту Іллічівськ, доставленого контейнеровозами з алжирського порту Шкікда (Skikda).

Ціна транспортування контейнерів орендованого в чартер контейнеровоза за один рейс

$$C_{м.1} = C_{ч} \cdot n_{lp},$$

де $C_{ч}$ = 35000 дол. США/доба – світова ставка чартеру контейнеровозів за добу.

Результати оцінок, які було отримано, наведено в таблиці 2.

Порівняння тарифів перевезення природного газу зображено на рис. 14.

Економічна оцінка проведена з урахуванням вартості природного газу для України – 179,5 USD/1000 м³; якщо вартість газу буде підвищено удвічі, економічні показники системи морського транспортування стиснутого газу (CNG) на судах контейнеровозах відповідно покращаться.

СТАН РОЗРОБКИ ТЕХНОЛОГІЙ ТРАНСПОРТУВАННЯ CNG КОНТЕЙНЕРОВОЗАМИ В УКРАЇНІ

1. Шляхи прискорення впровадження запропонованої технології морського транспортування стиснутого природного газу

Для прискорення впровадження запропонованої технології морського транспортування стиснутого природного газу можливі такі варіанти використання контейнеровозів:

- 1) закупівля контейнеровозів за кордоном;
- 2) фрахтування контейнеровозів зарубіжних компаній;
- 3) чартерна оренда контейнеровозів.

Одночасно необхідно розпочинати будівництво вітчизняних контейнеровозів на суднобудівних заводах Миколаєва.

2. Науково-виробничий потенціал України для створення базових елементів нової технології

В Україні є достатній науково-виробничий потенціал для створення базового елемента нової технології – власних конкурентноздатних спеціальних морських контейнерів для транспортування стиснутого природного газу (газові контейнери), зокрема й запатентовану технологію транспортування стиснутого природного газу [3]:

- власне науково-технічне супроводження (Національний університет кораблебудування, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу та Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України);
- власні проєктанти суден-контейнеровозів (Морське інженерне бюро, Одеса; ВАТ "Чорномосуднопроект", Миколаїв);
- власні конкурентноздатні балони високого тиску (ДП ВО "Південний машинобудівний завод", Дніпропетровськ; Науково-виробниче підприємство "Синтез", Донецьк);
- власні конкурентноздатні спеціальні морські модулі, Миколаїв.

ПЕРЕВАГИ

1. Нижча вартість транспортування газу порівняно з глибоководними трубопроводами та LNG.
2. Можливість швидкого самостійного проєктування та будівництва CNG-контейнеровозів та балонів високого тиску.
3. Наявність досвіду проєктування та будівництва суден-контейнеровозів.
4. Наявність власного науково-технічного супроводу.
5. Відсутність необхідності будівництва заводу регазифікації у порту вивантаження.
6. Відсутність енерговитрат на регазифікацію.
7. Немає необхідності у проєктуванні та будівництві дорогих та технічно складних суден-газовозів для перевезення зрідженого газу.

8. Можливість доставки CNG-модулів з газом із порту вивантаження у будь-яку точку України автомобільним і залізничним транспортом.

9. Нижчий рівень екологічної небезпеки.

ВИСНОВКИ

Для реалізації концепції технології транспортування стиснутого природного газу (CNG) на CNG-контейнеровозах Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу разом з Національним університетом кораблебудування імені адмірала Макарова та Інститутом електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України мають можливість розробити відповідне техніко-економічне обґрунтування, виконати необхідні проєктні і експериментальні роботи, вести науково-технічне супроводження впровадження проєкту на замовлення НАК "Нафтогаз України".

Література

- 1 Зайцев В.В. Суда-газовозы / Зайцев В.В., Коробанов Ю.Н. – Л.: Судостроение, 1990. – 304 с.
- 2 Зайцев В.В. Техничко-економические вопросы проектирования и строительства систем морской транспортировки газов / Зайцев В.В., Еганов А.Е., Толышев Э.В. – Николаев: УГМТУ, 2002. – 150 с.
- 3 Пат. 33882 Україна, МПК (2006) F17C 5/00. Спосіб транспортування стиснутого природного газу / Є.І. Крижанівський, В.В. Зайцев, Г.Ф. Романовський, О.М. Карпаш, М.І. Гончарук, Д.В. Зайцев, Вал.В. Зайцев. – № u200804626; заявл. 10.04.08; опубл. 10.07.08 // Промислова власність. – 2008. – Бюл. № 13.
- 4 Пат. 42693 Україна, МПК(2009) B67D 5/00 F17C 1/00 Транспортний CNG-модуль / Є.І. Крижанівський, В.В. Зайцев, Вал.В. Зайцев, Д.В. Зайцев, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № u200903995; заявл. 23.04.09; опубл. 10.07.09 // Промислова власність. – 2009. – Бюл. № 13.
- 5 Пат. 42694 Україна, МПК(2009) B67D 5/00 F17C 1/00 Спосіб морського транспортування стиснутого природного газу в CNG-модулях / Є.І. Крижанівський, В.В. Зайцев, Вал.В. Зайцев, Д.В. Зайцев, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № u200903996; заявл. 23.04.09; опубл. 10.07.09 // Промислова власність. – 2009. – Бюл. № 13.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
16.11.10
Рекомендована до друку професором
Мойсишиним В.М.*